

## 1318 気泡を含む液体中を伝播する衝撃波現象に関する研究

A Study on the Shock Wave Phenomena in Liquids Containing Air Bubbles

○学 山下 明彦(室蘭工大院) 正 杉山 弘(室蘭工大) 正 溝端 一秀(室蘭工大)  
正 湊 亮二郎(室蘭工大) 学 小笠原 久敏(室蘭工大院)

Akihiko YAMASHITA, Hiromu SUGIYAMA, Kazuhide MIZOBATA, Ryojiro MINATO and Hisatoshi OGASAWARA  
Dept. of Mechanical Systems Eng., Muroran Institute of Technology, 27-1, Mizumoto, Muroran, Hokkaido, 050-8585 JAPAN

**Abstract** Shock wave propagation and collapse of gas bubbles caused by a shock in a water containing gas bubbles are of large interest in relation to characteristics of water hammer, blowdown of high pressure liquids in pipes, etc. The large-amplitude shock wave propagations in the bubbly liquids are investigated using a two-phase shock tube. Effects of incident shock wave strength on shock wave pressure characteristics are clarified. Behavior of the bubbles collapsing behind large-amplitude shock waves is also clarified by pressure history measurements and high speed photography.

**Keywords:** Shock wave, Bubbly liquid, Bubble collapse, Precursor, Shock tube

## 1. 緒言

気泡を含む液体中を伝播する衝撃波現象に関する研究は、気液二相流中の水撃現象、高圧容器からの液体の放出現象、火山における水蒸気爆発、混相媒体における衝撃波強さの低減等と関連して重要であり、これまでに多くの研究がなされてきている。しかし、気泡液体中を伝播する衝撃波現象は、気体中を伝播する衝撃波とは特性が異なり非常に複雑である。特に、比較的強い衝撃波が気泡液体中を伝播する際に生じる衝撃波波頭背後の不規則で激しい圧力振動、また衝撃波の到達に先立つ圧力プリカーサ(予兆)現象などについては、不明な点が多く残されている<sup>(1)(2)</sup>。

そこで本研究では、縦型の二相衝撃波管を用いて、比較的強い衝撃波を気泡液体中に入射させ、気泡を含む液体中を伝播する強い衝撃波の圧力特性と気泡崩壊現象を、圧力測定と高速度ビデオカメラを用いた可視化により調べた。

## 2. 実験装置および方法

Fig.1に実験装置の概略図を示す。実験装置は高圧室、低圧室からなる気液二相衝撃波管、気泡発生装置、および圧力測定系から構成されている。実験方法は以下のである。まず二相衝撃波管に設定水位まで液相媒体を注入し、管底に取り付けられた気泡発生装置により気泡を発生させ

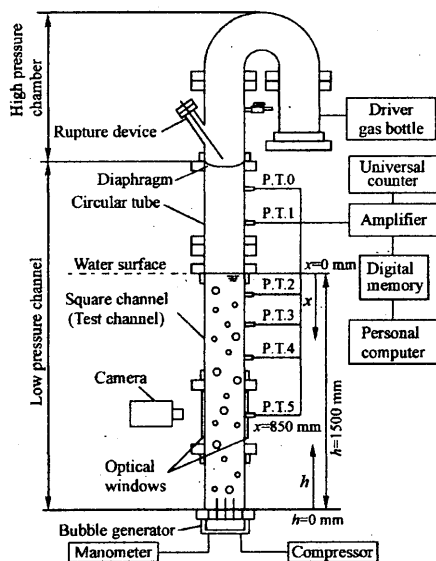


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

る。次に高圧室に圧縮空気を充填し、隔膜を電磁撃針装置により破膜して、衝撃波を発生させる。衝撃波が入射した際の圧力を、高周波数応答性をもつ圧力変換器(Fig.1のP.T.1~P.T.5)を用いて測定するとともに、衝撃波が作用した際の気泡群の挙動を高速度ビデオカメラにより撮影する。なお実験に用いた液相媒体、気相媒体はそれぞれグリセリン80%水溶液、空気であり、管底からの初期設定水位 $h$ は1500 mmまたは650 mmである。初期ボイド率 $\alpha_0$ は $h=650$  mmの位置にある観測窓より撮影した気泡群の影写真から求めた。

## 3. 実験結果と考察

## 3.1 気泡液体中を伝播する衝撃波の圧力特性

Fig.2(a), (b)に、衝撃波が気泡液体中を伝播する際の圧

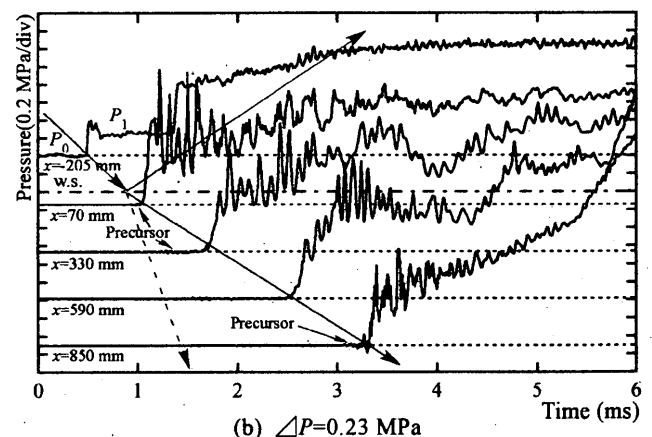
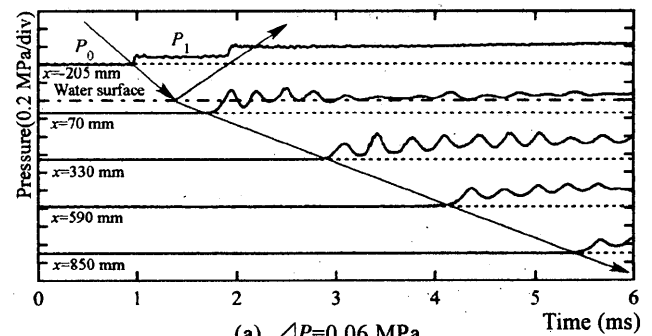


Fig.2 Shock wave pressure histories in bubbly liquid.  
( $\alpha_0=0.5\%$ )

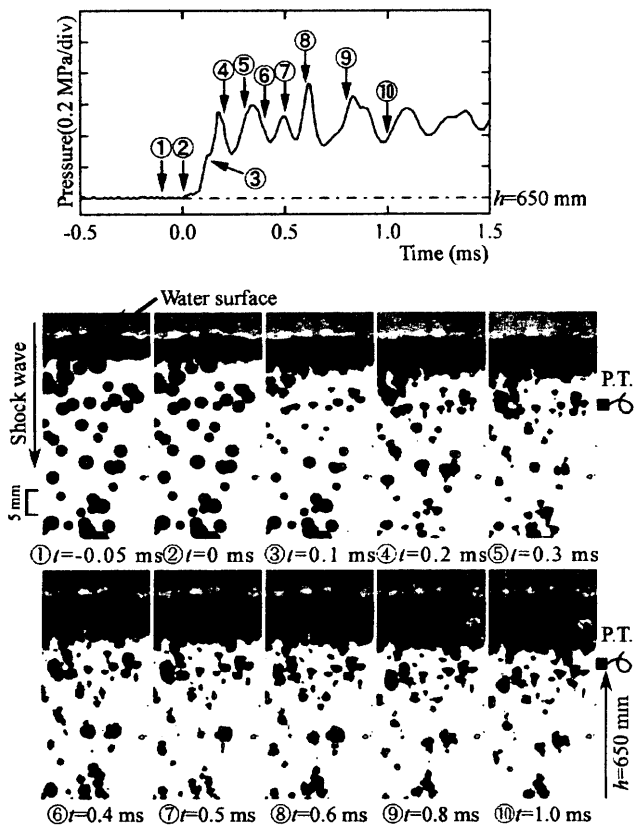


Fig.3 Sequential photographs of air bubbles collapsing at shock arrival in the bubbly liquid. ( $\Delta P=0.17$  MPa,  $\alpha_0=0.4$  %)

力の時間変化を示す。実験条件は、初期ボイド率  $\alpha_0=0.5$  %、平均気泡径  $d_0=1.5$  mm、入射衝撃波圧力ステップ  $\Delta P (=P_1-P_0)$  はそれぞれ 0.06 MPa, 0.23 MPa である。図中には各圧力測定点の気液界面からの距離  $x$  を示す。

これらの図を比較すると、 $\Delta P=0.23$  MPa の場合には  $\Delta P=0.06$  MPa の場合と比較して、衝撃波波頭背後における圧力変動は不規則で大きな振幅を伴うことがわかる。またその圧力変動の振幅は、特に気液界面に近い圧力測定点において大きく、衝撃波が気泡液体中を伝播するにつれて減衰していく様子が確認できる。このような圧力変動は、気相単相や液相単相の場合には生じないことから、衝撃波が伝播する際の気泡の存在が深く関連していると考えられる。

$\Delta P=0.23$  MPa の場合には、衝撃波の到達に先立って圧力のプリカーサが生じている。このプリカーサに関しては、過去の研究から  $\Delta P$  が大きいほど明瞭に発生し、またプリカーサの圧力変動は液体中の音速に近い速度で伝播することがわかっている<sup>(1)</sup>。このプリカーサの圧力変動を時間周波数解析すると、気泡単体の場合の固有振動数を大きく上回る高周波数(30 kHz~50 kHz)振動成分が含まれていることがわかる。

### 3.2 衝撃波による気泡群の変形と崩壊

Fig.3 は、上から下の方向へ衝撃波が通過した際における気泡群の変形・崩壊挙動を高速度カメラで撮影したものである。Fig.3 上部にある図は  $h=650$  mm の位置で測定した圧力波形であり、 $t$  は衝撃波が気液界面に入射した瞬間を基準とした経過時間であり、矢印①~⑩で示す時刻はそれぞれ下の写真の時刻に対応している。図中の P.T. は圧力変換器位置を示す。実験条件は初期ボイド率  $\alpha=0.4$  %、 $\Delta P=0.17$  MPa、撮影条件は撮影速度 20,000 fps、シャッター速度  $20 \mu s$ 、撮影位置は気液界面近傍である。写真①よ

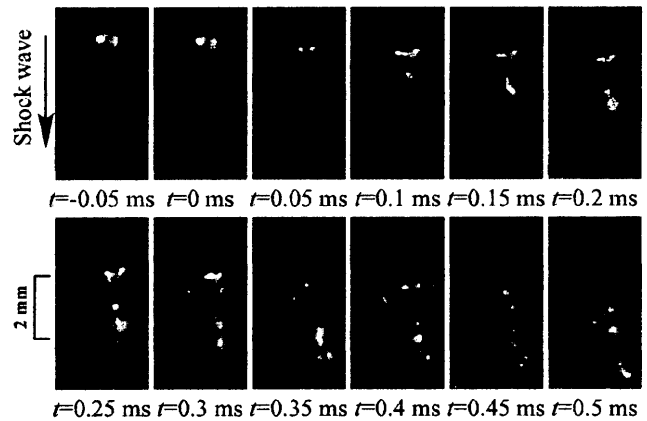


Fig.4 Sequential photographs of air bubble collapsing at shock arrival. ( $\Delta P=0.17$  MPa,  $\alpha_0=0.4$  %)

り直径 1~3 mm の気泡が初期に存在していることがわかる。

写真① ( $t=-0.05$  ms) は衝撃波通過直前の気泡の状態を示し、写真② ( $t=0$  ms) は気泡液体中に衝撃波が入射した瞬間である。写真③ ( $t=0.1$  ms) において気泡群は、衝撃波面通過後の急激な圧力上昇により大きく収縮している。その後写真⑩ ( $t=1.0$  ms) まで気泡は大きく変形し続け、またすべての気泡は下方へと移動している様子が見られる。写真③ ( $t=0.1$  ms) での水面直下や、写真④ ( $t=0.2$  ms) の時刻において、気泡からマイクロジェットが衝撃波伝播方向に発生していることがわかる。そして⑤ ( $t=0.3$  ms) では、発生したマイクロジェットが元の気泡から分離し、気泡の分裂が生じていることが確認できる。その後、時間が経過すると、隣接した気泡同士が合体、気泡群が収縮・膨張、崩壊することがわかる。

Fig.4 は、同じ条件のもとで単一気泡の挙動を可視化した連続写真である。 $t=0$  ms が、衝撃波が気泡に到達した瞬間である。 $t=0.05$  ms において、気泡は大きく収縮し、また気泡上面が平坦になることがわかる。 $t=0.1$  ms において気泡からマイクロジェットが発生し、 $t=0.25$  ms にわたって成長している。 $t=0.3$  ms ではマイクロジェットからさらに微小なマイクロジェットが発生し、またそれらのマイクロジェットはもとの気泡と分離している。その後、分裂したこれらの気泡は、時間の経過に伴い膨張・収縮を経て崩壊していく様子が見られる。なお、気泡は衝撃波によって誘起された液体の流れの影響を受け、下方へ約 2 mm 移動していることがわかる。

### 4. 結 言

本研究では、気液二相衝撃波管を用いて、比較的強い衝撃波が気泡液体中を伝播する際の衝撃波圧力特性について調べた。その結果、衝撃波波頭背後の圧力は激しく振動すること、衝撃波の到達前にプリカーサ現象が発生することがわかった。また、衝撃波が気泡群に作用した際の気泡の挙動を、高速度ビデオカメラを用いて調べ、マイクロジェットの発生、気泡変形、分裂・崩壊挙動を詳細に観察した。

### 参考文献

- (1) 大谷・杉山・溝端, 気泡を含む液体中を伝播する強い衝撃波と気泡崩壊, 日本機械学会論文集(B編), 68巻670号, (2002-6), pp.1646-1652.
- (2) 小笠原・杉山・溝端・大谷・山下, 気泡液体中を伝播する衝撃波現象に関する研究, 日本機械学会北海道支部 第43回講演会概要集(2003-9), pp.56-57.